



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

CONCEPÇÃO DO DISPOSITIVO DE GERAÇÃO DE ENERGIA POR CORRENTES DOS OCEANOS E RIOS

Guilherme Amaral do Prado Campos, gcampos.cefet@gmail.com^{1,2}

Fabício Lopes e Silva, fabricio.silva@cefet-rj.br¹

Luciano Santos Constantin Raptopoulos, luciano.raptopoulos@cefet-rj.br^{1,2}

Max Suell Dutra, max@mecanica.ufrj.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca campus Nova Iguaçu - NUPEM/CEFET-RJ, estrada de Adrianópolis, nº1.317, Santa Rita, Nova Iguaçu, RJ, CEP 26041-271,

²Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – PEM/COPPE/UFRJ.

Resumo: Os Hidrofólios Oscilantes são dispositivos com capacidade de transformar a energia das correntes oceânicas, mares e rios em energia elétrica. Neste trabalho são estudados dispositivos desta natureza compostos de uma única asa, tendo sido desenvolvido um modelo no qual foi utilizado o perfil NACA 0015. Na análise foram aplicadas condições de contorno e de carregamento coerentes com as existentes em correntes oceânicas, fazendo variar tanto a posição da asa do dispositivo, quanto as velocidades das correntes. Estas simulações permitiram levantar os esforços atuantes sobre a estrutura da asa, assim como determinar sua dinâmica de oscilação e, consequentemente, sua capacidade teórica de geração de energia. O resultado principal deste trabalho foi a síntese de um dispositivo conversor de energia cuja eficiência teórica foi de aproximadamente 20,5%.

Palavras-chave: Energia dos oceanos, energia por correntes oceânicas, hidrofólio oscilante.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica com origem em fontes oceânicas possui uma capacidade de geração significativa, uma vez que apenas a energia das ondas possui a capacidade teórica de gerar 32.000 TWh/ano, ou seja, cerca de duas vezes o fornecimento de eletricidade mundial no ano de 2008, segundo Lewis et. al. (2011). Contudo a sua utilização continua exígua se comparada com as fontes de origens fósseis. Muito embora alguns países tivessem tentado avançar na área de conversores de energia dos oceanos, ainda existe a necessidade de investimento público e privado para a redução de seus custos e aprimoramento destas tecnologias.

Atualmente, muitos conversores (dispositivos) capazes de transformar a energia dos oceanos em energia elétrica estão em desenvolvimento em países como: Dinamarca, Inglaterra, Alemanha, Portugal, Espanha, Canadá, Austrália e Brasil, entre outros. Alguns desses dispositivos são na área de geração por correntes oceânicas e podem ser divididos em: Turbina Horizontal, Turbina Vertical, Venturi e Hidrofólio Oscilante.

Neste trabalho optou-se por estudar e desenvolver um dispositivo do tipo Hidrofólio Oscilante por ser um modelo com grande potencial de melhoria, visto que o mesmo foi pouco estudado até o presente momento. Outro ponto relevante que influenciou o seu estudo foi a suavidade do seu movimento que aparentemente é menos nocivo ao meio ambiente onde geralmente é instalado.

2. HIDROFÓLIO OSCILANTE

Os Hidrofólios Oscilantes (*Oscillating Hydrofoil* ou *Flapping foil*) são dispositivos desenvolvidos para geração de energia por correntes dos oceanos, marés ou rios, sendo modelos alternativos as turbinas de eixo horizontal e vertical. Como o seu estudo é recente, existem diversas configurações desenvolvidas e em desenvolvimento, porém poucas em operação e com estudos consolidados. Esses modelos, geralmente, possuem a asa na posição horizontal (ou seja, paralelas ao escoamento do fluido) ou na posição vertical (ou seja, pás perpendiculares ao escoamento do fluido) como apresentado na Fig.1, sendo uma minoria de protótipos que permitem a asa seguir a orientação do fluido.

A asa é o principal componente de um Hidrofólio e, geralmente, possui o formato de um perfil aerodinâmico com característica de simetria. Essa característica permite que o movimento oscilatório do perfil se torne o mais homogêneo possível.

Nas próximas seções serão discutidas a origem dos Hidrofólios, sua evolução até o presente momento e os princípios de funcionamento.

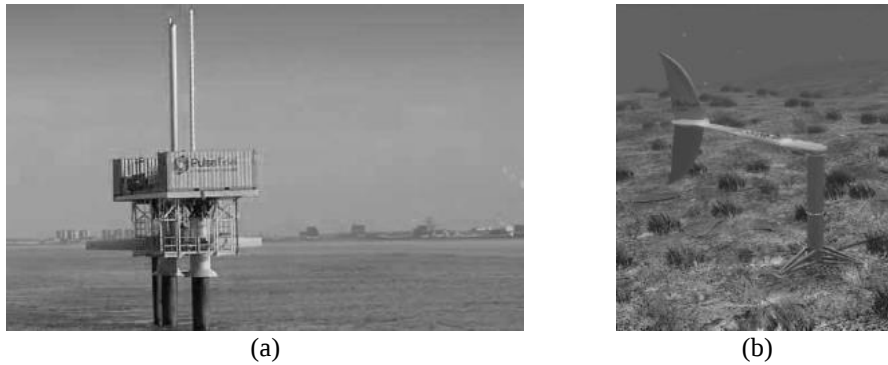


Figura 1. Modelos de Hidrofólios Oscilantes: (a) Pulse-Stream com asa na posição horizontal (Renewable, 2012); (b) Biostream com asa na posição vertical (Kloos, 2009).

2.1. Estado da Técnica

O primeiro Hidrofólio Oscilante (*Oscillating Foil*) surgiu na década de 70 com os pesquisadores Adamko & DeLaurier num estudo preliminar sobre o tema. Contudo a primeira publicação sobre o tema só ocorreu em 1981 após McKinney e o próprio DeLaurier conseguirem resultados significativos do uso de uma asa oscilante na extração de energia de um fluido, sendo nesse caso utilizado o próprio ar como fluido para geração de energia (Ballard, 2013 e Campos, 2013). Esse primeiro protótipo ficou conhecido como *Wingmill* e atingiu o rendimento de 16,8% considerando um *pitching* com 30° de amplitude, um *heaving* de 0,3 de comprimento da corda e uma frequência reduzida de 0,12, segundo Kinsey et. al. (2010).

Apesar da descoberta, o primeiro protótipo comercial só foi desenvolvido em 1997 pela empresa *Enginnering Business Ltd* e foi chamado de *Stingray*, sendo sua potência teórica de 150 kW. Embora todos estivessem entusiasmados com tal feito, os testes só foram realizados em 2003 na Escócia e seus resultados ficaram abaixo do esperado, visto que sua eficiência máxima foi de 11,5%. O resultado evidenciou que esse tipo de dispositivo não era eficaz, mas alguns pesquisadores continuaram a insistir nesse tipo de tecnologia. A partir dessa dedicação a pesquisa é que a Universidade de Laval, em Quebec no Canada, conseguiu obter o que parecia impossível, uma eficiência de 40% para um dispositivo com duas pás. Já para o caso de apenas uma pá sua eficiência foi de aproximadamente 30%, segundo Kinsey et. al. (2010).

Atualmente, existem alguns dispositivos instalados e gerando energia elétrica a partir dessa fonte como o protótipo Pulse-Stream com capacidade de 100 kW, segundo o relatório Renewable UK (2012).

2.2. Princípio de Funcionamento do Hidrofólio

O Hidrofólio Oscilante com pá na horizontal possui um movimento combinado transversal harmônico (*heave*) e angular harmônico (*pitch*). O funcionamento desse dispositivo baseia-se no movimento combinado e no torque gerado pelas forças hidrodinâmicas. As Equações (1), (2) e (3) descrevem de forma matemática o movimento transversal e angular (Kinsey, 2010 e Huxham, 2012).

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$h(t) = r \sin(\theta(t)) \quad (2)$$

$$d = 2,55 \cdot c \quad (3)$$

Onde, α_0 é a amplitude de *pitching* inicial, $\alpha(t)$ é a variação de *pitching*, ω é a frequência angular ($\omega = 2\pi f$), $h(t)$ é a variação do movimento de translação (*heaving*), r é o comprimento do braço, $\theta(t)$ é o ângulo de *heave*, d é amplitude máxima do movimento de *heave*, e c é a corda da asa. Na Fig. 2 é possível observar o movimento combinado, sendo o ponto de giro de *pitching* na posição onde o perfil sofre os esforços aerodinâmicos de sustentação e arraste. E a relação pode ser expressa pela Eq. (4) (vide Fig. 2a) como mostrado por Huxham et. al. (2012).

$$\frac{a}{c} = 0,25 \quad (4)$$

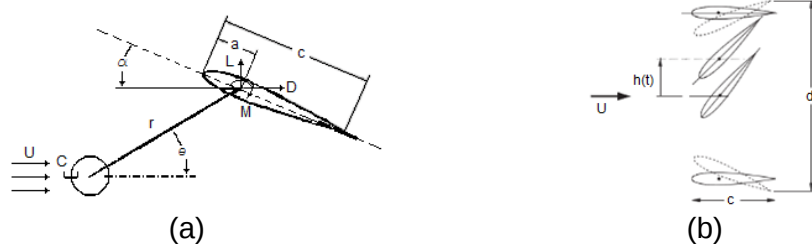


Figura 2. (a) Esquema do modelo Hidrofólio (Huxham et. al., 2012); (b) Movimento de *pitching* e *heaving* (Kinsey et. al., 2010).

A frequência do movimento angular (*pitching*) pode ser determinada através da Eq. (5) (Kinsey, 2010 e Huxham, 2012).

$$f^* = \frac{fc}{U} \quad (5)$$

Onde: f^* é a frequência reduzida (adimensional), f é a frequência de *pitching* e U é a velocidade do fluido. A partir das Equações (1), (2), (3), (4) e (5) é possível avaliar também os esforços sobre o perfil. Ele está sujeito as seguintes forças no tempo $X(t)$ e $Y(t)$, sendo “ X ” frontal e “ Y ” na direção transversal de sustentação. A força média (F) é calculada pela Eq. (6) e Eq. (7) da potência média (P) obtida por Anderson et. al. (1997).

$$F = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (6)$$

$$P = \frac{1}{T} \left(\int_0^T Y(t) \frac{dh}{dt}(t) dt + \int_0^T Q(t) \frac{d\theta}{dt}(t) dt \right) \quad (7)$$

Onde: $Q(t)$ é o torque, T é o período de oscilação. A equação de potência pode ser simplificada para a Eq. (8), segundo Anderson et. al. (1997).

$$P(t) = Q(t) \cdot \Omega(t) \quad (8)$$

Onde: $\Omega(t)$ é a rotação do Hidrofólio e $P(t)$ é a potência como função do tempo. Com esses parâmetros será possível avaliar o desempenho do Hidrofólio proposto.

3. ELABORAÇÃO DO PROJETO

Para a concepção do projeto foram considerados os avanços realizados por outros autores nessa área, contudo também foi necessário desenvolver um conhecimento crítico sobre o dispositivo avaliando diversos modelos. Dessa forma, inicialmente foram concebidos quatro modelos com as mesmas proporções apresentados na Fig. 3.



Figura 3. Modelos de Hidrofólios Oscilantes desenvolvidos: (a) 1º Modelo: com uma placa na vertical; (b) 2º Modelo: com três placas na vertical; (c) 3º Modelo: com perfil hidrodinâmico na horizontal com um braço; e (d) 4º Modelo: com perfil hidrodinâmico na horizontal com dois braços.

Para avaliar o modelo mais eficiente, foi analisado o comportamento hidrodinâmico através de simulações em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Essas simulações são baseadas no método de volumes finitos e permitem ao usuário obter, por exemplo, campos de velocidade e de pressão sobre a superfície de uma estrutura.

As condições de contorno foram às mesmas para todos os casos. A velocidade foi definida como constante e de valor igual a 2 m/s na direção do fluxo, paralelo ao chão e da esquerda para direita. O fluido utilizado foi à água do mar a 20 °C (293,2 K) de temperatura, pressão de 101325 Pa e massa específica de 997 kg/m³. O ambiente considerado na simulação computacional foi externo, com escoamento predominantemente laminar, sendo o escoamento turbulento de intensidade igual a 2% apenas, além de considerar um local com paredes adiabáticas e rugosidade irrelevante.

As análises dos resultados foram feitas de forma simplificada considerando apenas a posição de repouso dos dispositivos. Como resultado, a estrutura do quarto modelo apresentou a menor interferência hidrodinâmica se comparado com os demais, sendo um dos parâmetros relevantes nessa análise à pressão estática sobre a estrutura, como pode ser visto na Fig. 4.

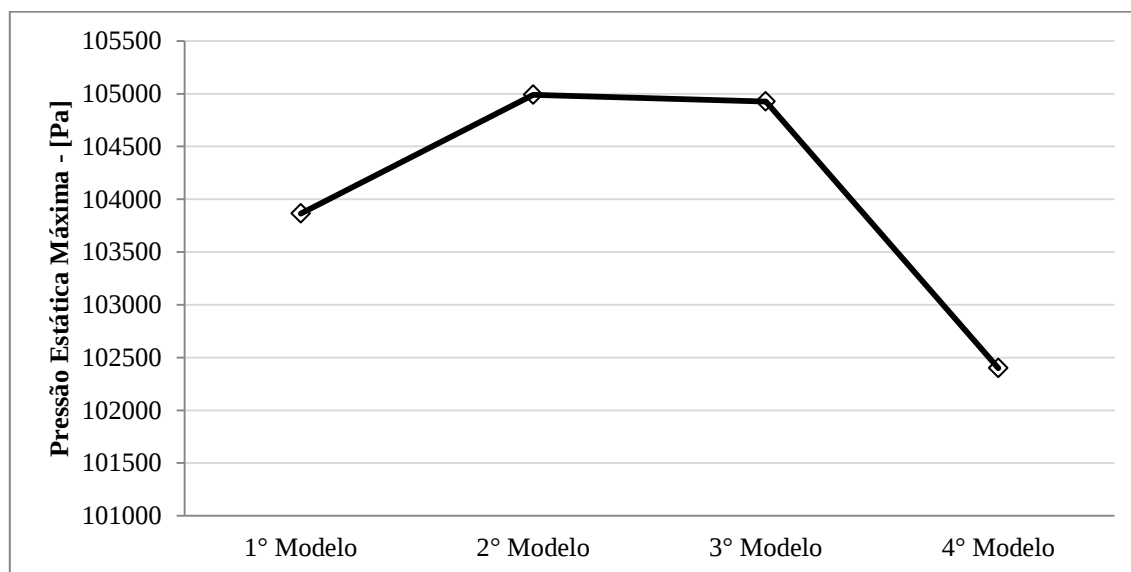


Figura 4. Pressão estática sobre a estrutura de cada modelo.

Dessa forma, o projeto proposto foi concebido com apenas uma asa e com dois braços de torque acoplados a um sistema de transmissão com a capacidade de transformar o movimento oscilatório do braço em um movimento contínuo (vide Fig. 5). O sistema de transmissão é composto por correntes e rodas dentadas, além de um sistema de catraca para o momento de inversão do sistema oscilatório da asa, como mostrado na Fig. 6.

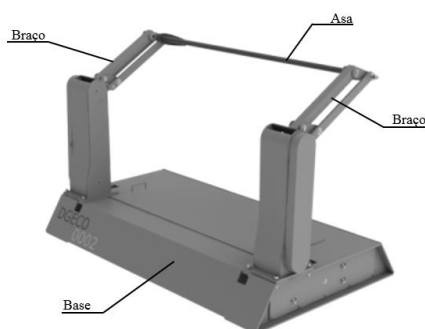


Figura 5. Projeto do Hidrofólio Oscilante.

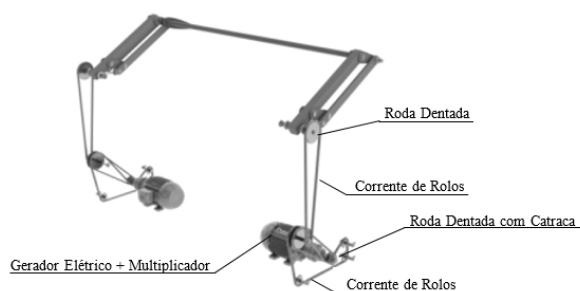


Figura 6. Sistema de transmissão.

Nos estudos de casos e nos resultados obtidos será possível concluir se o formato do dispositivo de geração por correntes oceânicas (DGEÇO) pode ser considerado viável ou não, e assim, realizar uma análise dos pontos críticos do projeto.

4. ESTUDOS DE CASOS

Definido o projeto conceitual mecânico e hidrodinâmico do dispositivo foram então analisados os esforços sobre a asa para cada condição de escoamento proposto no estudo. Os estudos de casos foram definidos para avaliar de forma estimada a potência e a eficiência do dispositivo. Com isso, foram definidas as características do perfil hidrodinâmico, os limites do ângulo de ataque e do ângulo do braço. A partir disso também as condições do escoamento, o tipo de fluido, o tipo de escoamento, a velocidade do fluido e as condições ambientais.

As características do perfil hidrodinâmico foram definidas segundo sua aplicação. Como se trata de um conversor que possui um movimento oscilatório (movimento de sobe e desce) e necessita da inversão do movimento, é imprescindível que ele seja simétrico, sendo assim, o modelo escolhido foi o NACA 0015 e o seu dimensional encontra-se na Tab. 1.

Tabela 1. Características do perfil hidrodinâmico.

Perfil Hidrodinâmico	NACA 0015
Modelo	Simétrico
Corda	240 mm
Envergadura	1680 mm

Os dados do coeficiente de sustentação e de arrasto do perfil NACA 0015 foram os mesmos do trabalho de Campos (2013). A condição relativa ao movimento oscilatório estará limitada pela regra “ $d=2,55c$ ” definida por Kinsey et. al. (2010), tendo como consequência o ângulo de operação do braço do dispositivo que ficou entre o ângulo de 30 graus (θ_{5s}) e -30 graus (θ_{1s}), considerando como referencial a linha horizontal fixada no ponto de giro do braço, apresentado na Fig. 7a.

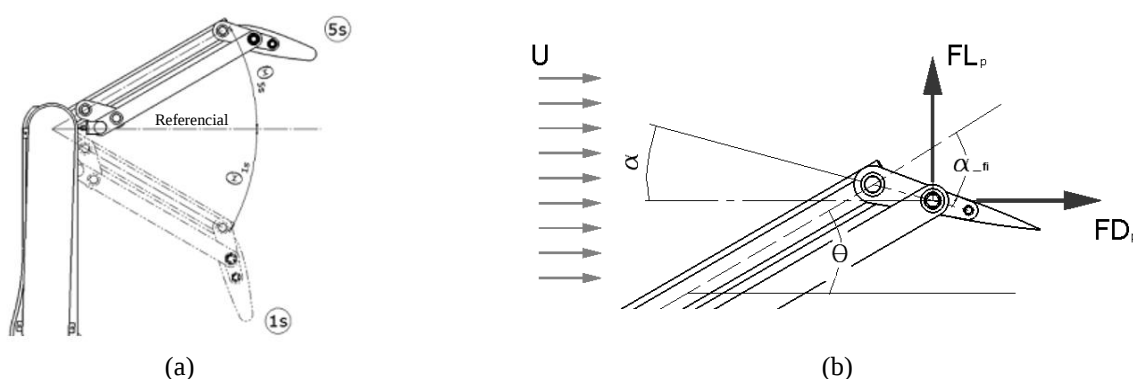


Figura 7. (a) Movimento do dispositivo e (b) Diagrama de forças hidrodinâmicas sobre a asa.

Uma condição de contorno importante no desenvolvimento do DGEÇO foi à escolha do ângulo de ataque fixo. Essa característica permitiu que ao final de cada movimento de descida ou de subida o dispositivo alcança-se a força máxima e, conseqüentemente, fosse garantida sua inversão no ponto desejado. O ângulo adotado foi de 45 graus e foi esse valor que permitiu garantir os 15° necessários para a força de sustentação máxima ao fim de cada movimento. Na Tabela 2 são demonstrados os ângulos a partir das 5 posições de subida e das 5 posições de descida.

Tabela 2. Características do perfil hidrodinâmico.

Posições	Ângulo do Braço (θ)	Ângulo de Ataque fixo (α_{fi})	Ângulo de Ataque Efetivo (α)
1s	30°	45°	75°
2s	15°	45°	60°
3s	0°	45°	45°
4s	-15°	45°	30°
5s	-30°	45°	15°
1d	30°	45°	75°
2d	15°	45°	60°
3d	0°	45°	45°
4d	-15°	45°	30°
5d	-30°	45°	15°

5. RESULTADOS

Como resultados dos estudos de casos foram obtidos os esforços hidrodinâmicos sobre a asa, sendo que os mais relevantes foram a força de sustentação (FL) e a força de arrasto (FD), como é representado na Fig. 7b. Os valores dessas forças para cada velocidade proposta podem ser vistos na Fig. 8a e 8b, respectivamente.

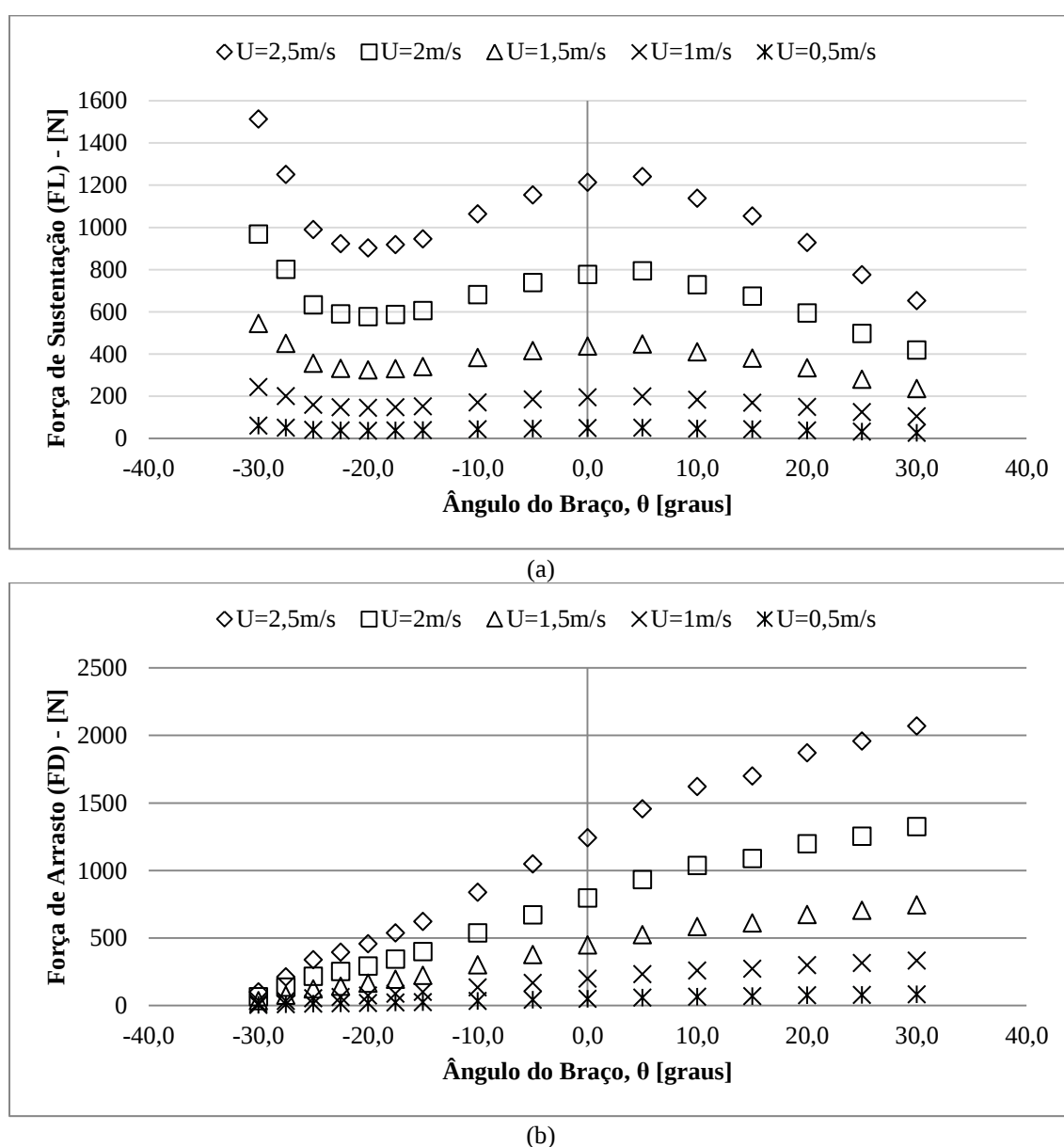


Figura 8. (a) Força de sustentação; (b) Força de arraste.

O efeito de empuxo sobre o braço do dispositivo foi desconsiderado, pois foi definido no projeto que o peso do braço será igual ao valor do empuxo. Já o cálculo do torque sobre o braço foi obtido a partir do cálculo das forças tangenciais (F_{tan}) e normais (F_N). As Eq. (9) e (10) definem a força tangencial e normal, respectivamente.

$$F_{tan} = FL \cdot \cos(\theta) + FD \cdot \sin(\theta) \quad (9)$$

$$F_N = FD \cdot \cos(\theta) + FL \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

Para analisar as forças F_{tan} e F_N foi considerado apenas o caso onde a velocidade do fluido é igual a 2 m/s. Na Fig. 9 são apresentados os valores das forças de reação para cada ângulo do braço enquanto na Fig. 10 são vistos os valores das reações para cada posição do braço.

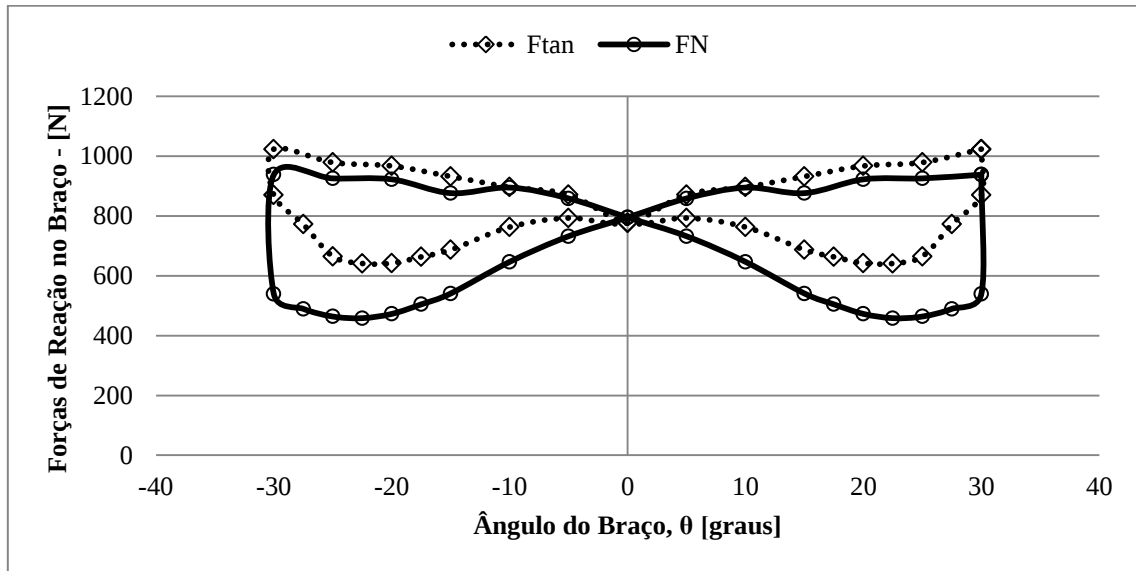


Figura 9. Forças de reação versus o ângulo do braço, para a velocidade de 2 m/s.

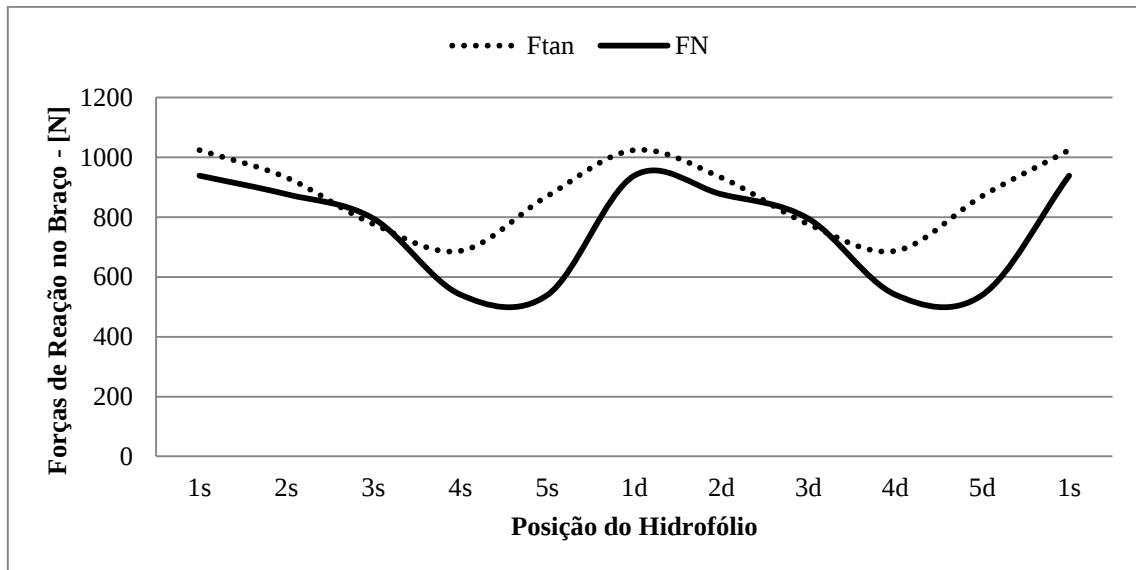


Figura 10. Forças de reação versus a posição da asa, para a velocidade de 2 m/s.

Finalmente, com o cálculo das forças tangenciais foi determinado o torque sobre o braço (T_{hidro}) através da Eq. (11).

$$T_{hidro} = F_{tan} \cdot L_b \quad (11)$$

Onde, L_b é o comprimento do braço e que no projeto proposto é de 612 mm. Considerando esse dado é possível verificar os valores de torque nas Fig. 11 e Fig.12 para o caso da velocidade do fluido igual a 2 m/s.

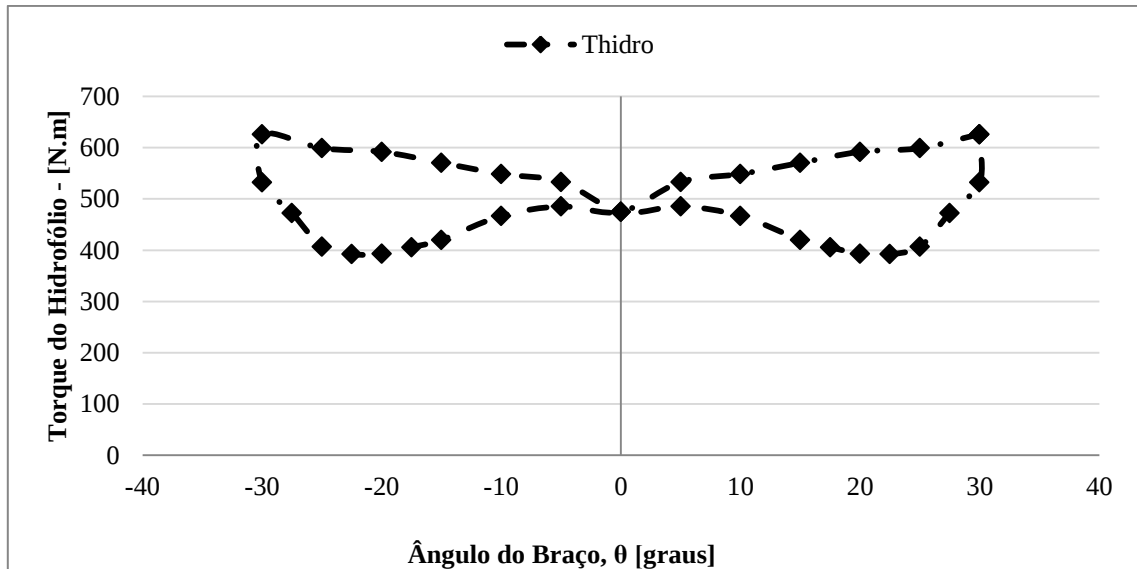


Figura 11. Torque do Hidrofólio versus o ângulo do braço, para a velocidade de 2 m/s.

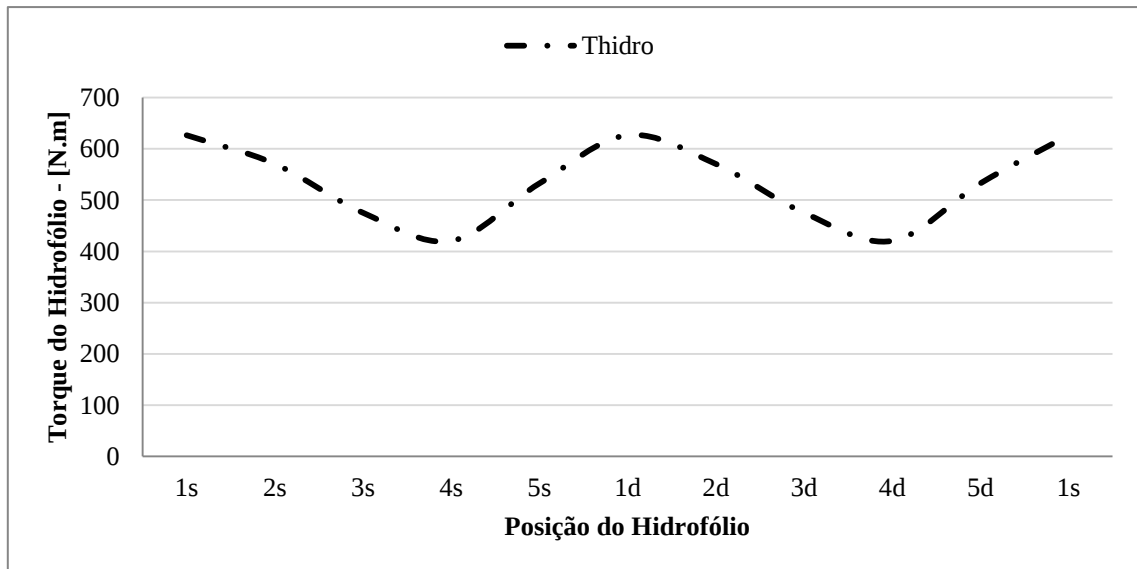


Figura 12. Torque do Hidrofólio em cada posição de operação, para a velocidade de 2 m/s.

Para fazer uma estimativa da potência será considerado o mesmo tempo que foi utilizado no projeto de Quebec no Canada, segundo Kinsey et. al. (2010). Ele possui a mesma característica de asa e velocidade de fluido. As diferenças entre os projetos estão no ângulo de ataque fixo (α_{fi}), no sistema de inversão da pá e no tipo de acionamento.

A potência teórica ($P_{teorica}$) pode ser calculada através da Eq. (12), enquanto a potência real (P_{real}) é calculada a partir do torque calculado pela Eq. (13).

$$P_{teorica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3 \cdot L_b \cdot c \quad (12)$$

$$P_{real} = T_{hidro} \cdot (\Omega \cdot \sin(\phi_f)) \quad (13)$$

Onde: L_b é o comprimento do braço, Ω é a velocidade angular do braço, ϕ_f é a fase entre o *pitching* e o *heaving*. Logo, considerando que a velocidade do fluido é igual a 2 m/s, os valores da potência teórica e real podem ser vistas na Fig. 13 e na Fig. 14.

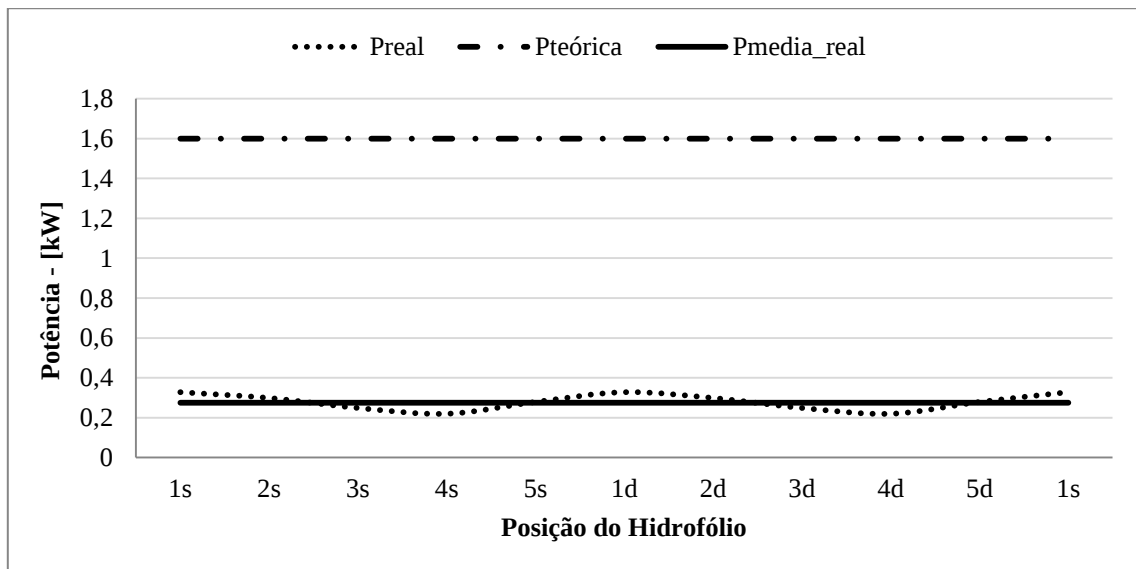


Figura 13. Potência versus ângulo do braço.

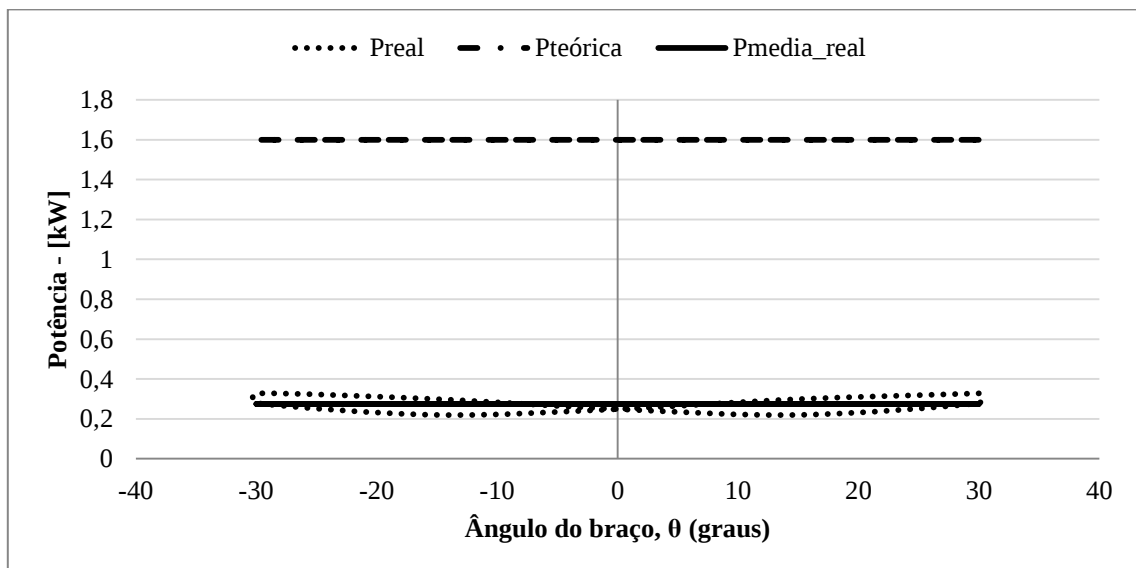


Figura 14. Potência versus Posição do Hidrofólio.

Após a obtenção da potência teórica e real foi possível obter que o maior rendimento do dispositivo proposto será de aproximadamente 20,5%. Um valor satisfatório se comparado com o projeto Stingray cujo rendimento é de 11,5%, mas abaixo dos 30% alcançado pela Universidade de Laval.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou uma forma pouco estudada até o presente momento de gerar energia elétrica a partir de correntes oceânicas, de marés ou de rios. Esse estudo permitirá outros pesquisadores conhecer melhor esse tipo de conversor de energia e aprimorá-lo para que se torne viável em um curto período de tempo.

O modelo de Hidrofólio Oscilante proposto possui a capacidade de ser instalado em águas rasas e operar com velocidade abaixo de 1 m/s, o que pode ser um fator positivo no momento de avaliar a viabilidade perante a outros modelos de conversores.

O projeto do dispositivo foi baseado em revisão bibliográfica, estudo de novos modelos para concepção do ideal e análise dos esforços para a determinação da potência e eficiência do mesmo. Com as condições de contorno definidas e as análises em CFD foi possível obter como resultado que o quarto modelo possui o melhor formato hidrodinâmico para esse tipo de aplicação. Após essa definição foram feitos estudos de casos para avaliar os esforços sobre o mesmo. Foi adotado apenas um dos casos estudados, onde a velocidade do fluido foi de 2 m/s para estimar a potência e a eficiência. O resultado foi que o Hidrofólio Oscilante proposto conseguiu atingir a marca de 20,5% de eficiência para esse caso específico.

Para trabalhos futuros se pretende estudar novos formatos de asa, novos sistemas de inversão de pá e desenvolver um protótipo para testes em túnel de água.

7. REFERÊNCIAS

- Anderson, J. M., Streitlein, K., Barrett, D. S., Triantafyllou, M. S., 1997, "Oscillating Foils of High Propulsive Efficiency". *Journal Fluid Mech*, v.360, pp. 41-72.
- Ballard, S., 2013, "3rd Generation Tidal Turbines: too efficient to ignore?". Disponível em: <http://www.stopthebarrage.com/documents/>. Acessado em Novembro de 2013.
- Campos, G.A.P., 2013, "Estudo de Mecanismo Aplicado na Geração de Energia a Partir de Correntes Oceânicas", Dissertação M.Sc., PEM/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Huxham, G. H., Cochard, S., Patterson, J., 2012, "Experimental Parametric Investigation of an Oscillating Hydrofoil Tidal Stream Energy Converter". In: 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Launceston, Australia.
- Lewis, A., Estefen, S., Huckerby, J., Musial, W., Pontes, T., Torresmartinez, J., 2011, "In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation", Ocean Energy, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kinsey, T., Dumas, G., Lalande, G., Ruel, J., Méhut, A., Viarouge, P., Lemay, J., Jean, Y., 2010, "Prototype testing of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils", *Journal Renewable Energy*, v.36 pp. 1710-1718.
- Kloos, G., Gonzalez, C. A., Finnigan, T. D., 2009, "The bioSTREAM Tidal Current Energy Converter". In: 8th European Wave and Tidal Energy Conference, pp.426-433, Uppsala, Sweden.
- Renewable UK, 2012, "Marine Energy in the UK – State of the Industry Report 2012".

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVICE DESIGN FOR GENERATE ENERGY BY CURRENTS OF OCEANS AND RIVES

Guilherme Amaral do Prado Campos, gcampos.cefet@gmail.com^{1,2}

Fabício Lopes e Silva, fabricao.silva@cefet-rj.br¹

Luciano Santos Constantin Raptopoulos, luciano.raptopoulos@cefet-rj.br^{1,2}

Max Suell Dutra, max@mecanica.ufrj.br²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca campus Nova Iguaçu - NUPEM/CEFET-RJ, estrada de Adrianópolis, nº1.317, Santa Rita, Nova Iguaçu, RJ, CEP 26041-271,

²Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – PEM/COPPE/UFRJ.

Abstract. *Oscillating Hydrofoils are power generation devices from currents of oceans and rivers. This work studied such devices composed of a single wing, having been developed a model which was used to profile NACA 0015. In the analysis were applied boundary conditions and loading consistent with existing in ocean currents by varying the position of the device wing and current velocities. These simulations have enabled the forces acting on the wing structure and to determine its dynamic oscillation and consequently its theoretical capacity of power generation. The main result was the synthesis of a power converter device whose theoretical efficiency was approximately 20.5%.*

Keywords: *Ocean energy, tidal energy, oscillating hydrofoil, flapping foil.*